

On the Structure of the Turbulent Field in the Surface Boundary Layer (接地層にかける乱流場の構造について)

著者	竹内 清秀
号	38
発行年	1964
URL	http://hdl.handle.net/10097/23151

氏 名・(本籍)	たけ　　うち　　きよ　　ひで 竹　　内　　清　　秀
学 位 の 種 類	理　　学　　博　　士
学 位 記 番 号	理　　第　　3　　8　　号
学位授与年月日	昭和39年4月15日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最　終　学　歴	昭和22年9月 東京帝国大学理学部卒業
学位論文題目	On the Structure of the Turbulent Field in the Surface Boundary Layer (接地層における乱流場の構造について)
論文審査委員	(主査) 教　授　山　本　義　一 教　授　加　藤　愛　雄 助教授　大　西　外　史 助教授　中　村　公　平

論　文　目　次

は　し　が　き

第 I 部

1. Kolmogoroffの慣性領域と Monin-Obukhovの相似理論
2. 接地層における乱流エネルギー逸散率

第 II 部

3. “対数+直線”法則
4. L , β および基礎的量の決定
5. 観測との比較
6. “巾”法則

第 III 部

7. 風速変動と安定度
8. 風向変動と安定度
9. フィルターを通した風向資料

む　す　び

論 文 内 容 要 旨

は し が き

最近、接地層における種々の拡散現象、例えば運動量、熱および水蒸気の輸送などが盛んに論議されている。特に実際のな面として、原子力の工場からの放射性物質の拡散、あるいは工場地帯における大気汚染などは社会問題として広く論議されている。これらの現象をよく理解するためには、まず接地層の構造をよく調べておかなければならない。

さて、温度成層のない場合の接地層の研究は、ほぼ完成されたと見られるかも知れないが、成層のある場合の現象は非常に複雑であつて、残されている問題が多い。幸い最近、米国オネールにおいて非常に広範囲な野外観測が2度にわたつて行われ、種々の細かい気象資料が出版された。一方、著者も米国滞在中、米国気象局において野外の風向変動の観測を実施した。主にこれらの資料に基いて、広い範囲の安定度のもとの接地層の構造を調べた。その解析の基礎は、Kolmogoroffの局部的等方性乱流理論およびMonin-Obukhovの接地層における相似理論である。著者はこの二者を結びつけ発展させた。

まず、風速および気温の平均値の垂直分布（プロファイルという）から種々の基礎量を決定し、それより計算で出した物理量と観測値を比較した。次に、風速および風向の変動を取扱う。はじめに、これらの標準偏差と安定度との関係、ならびにそれらの分散スペクトルと安定度との関係を調べた。ここでは、種々の条件のもとの観測値を統一的に扱うため、無次元スペクトルの型にして論じた。おわりに、とかく定常状態でないことの多い気象現象を解明する一助として、フィルターを通した後の風向変動の資料を解析した。

第 I 部

1. ここでは、第II部、第III部で行う資料解析の基礎となる理論を発展させている。まず、Kolmogoroffの提出した局部的等方性乱流理論、特に彼の第2の仮定の慣性領域について簡単に述べ、次に1954年MoninとObukhovが提案した接地層の相似理論を記している。Kolmogoroffは乱流場における種々の性質がそのエネルギー逸散率だけで決定される領域（慣性領域）があるとし、Monin-Obukhovは接地層における平均的な物理量は基礎的な3つの量、即ち摩擦応力、乱流による熱流束、それに浮力で決まるとした。
2. 著者は、これら2つの理論を結合し発展させて、接地層での種々の観測値の解析の基礎とした。即ち、前述の慣性領域においてもMonin-Obukhovの相似理論が成立するものと仮定し、乱流場で最も重要な役割をするエネルギー逸散率をMonin-Obukhovの基礎的な量で表わした。なお一層便利な型としてその無次元量を扱った。

第 II 部

3. ここでは主に風速および気温のプロファイルが扱われている。
温度成層が中立に近い場合、風速および気温のプロファイルが、“対数直線”法則で表わされることは一般に知られている。もしこの法則が一層広い安定度の範囲で成立すると仮定して、観測値を解析した。まず上の法則の実験式をたて、著者独特の図式解法により、実験式に出て来る基礎的な係数を求め、同時にこの実験式の可否を調べた。その結果、可成りの程度で実験式が成立すること（非常に安定な場合および不安定な場合を除くと良い）。即ち“対数直線”法則が広い範囲で成立することがわかつた。
4. 次に、上で求めた基礎的な係数より、Monin-Obukhovの言う基礎的な量その他が求められた。

例えば、摩擦速度は、風速のプロファイルの実験式中の対数項の係数に定数を乗じた値で表わされ、乱流による熱流束は、前述の係数の気温のそれに相当する係数との積に比例する量として求められる。ここで得られた注目すべき結果の一つとして、各プロファイルを表わす普遍関数にでて来る直線項の係数の値である。Monin - Obukhov は、これは普遍定数で 0.6 くらいであるとしたが、ここで得られた値は安定度により著しく変化している。中立に近い時には 5~10 であり、それよりはずれると小さくなる。これは後にオーストラリアで得た結果と一致している。

5. 以上、種々の物理量が、風速および気温のプロファイルより決定されたが、それらと直接得られた観測値とを比較した。計算による摩擦速度と摩擦応力の実測値、計算による熱流束と実測による風速および気温の変動などの関係が調べられた。ここでは、オーストラリアおよび英国での資料も比較のため使用した。その結果これらの可成りのよい一致が得られた。
6. おわりに、便利のためよく用いられる風速のプロファイルを表わす κ 巾法則を調べた。まず単純な κ 巾法則はある高さの範囲で近似的に成立することを確認し、その指数の値と安定度との関係を求めた。中立の時は $1/5 \sim 1/6$ を示し、安定の時にはこれより増し（非常に安定な時、0.6 くらい）、不安定な時には減少する（非常に不安定な時約 0.1）。次に、定数項をもつ κ 巾法則を調べた。その結果、指数の値はばらつくが、非常に不安定な時には -0.4、非常に安定の時には +0.5 に漸近するように思われる。しかし、これは相似理論から予想されるそれぞれの極端な場合の値、-0.3 および +1.0 と比較して安定側で大きくはずれている。

第 III 部

7. ここでは風速および風向の変動が扱われている。はじめに風速変動の標準偏差および分散スペクトルを論じ、次に風向変動の同じものを述べ、続いてフィルターを通した風向変動の資料を種々の角度から解析した。

まず風速の変動について記す。第一に風速の標準偏差と安定度との関係が調べられた。その結果は次のようである。(1) 風速の 3 成分とも、標準偏差を摩擦速度で割った値は安定度とともに減少する。(2) 水平方向の成分に関しては、不安定になるとともに等方性になつてくる。(3) しかし垂直成分は非等方性そのままである。

続いて分散スペクトルが調べられた。最初に周波数との関係を表わす κ 指数と安定度との関係が調べられた。この時、計算値そのままのスペクトルは相当点が散らばっているので予め平均化の操作をした。その結果は次のようである。(1) 3 成分とも、周波数が 0.08~0.3 %s の範囲で安定度とともに減少する。(2) 主風向の成分の値が他のものに比べて大きな値を持つ。(3) 中立状態で、主風向、横方向、縦方向の平均 κ 指数の値はそれぞれ -1.2, -0.7, -0.2 である。

分散スペクトルをなお一層統一的に論じるために、これを無次元の型で扱った。その結果、いろいろな観測状態（観測点の高さ、風速、安定度など）の下の風速のスペクトルが、唯安定度だけによつて決定されることがわかった。なお「最大乱子」の大きさを知るために、3 次元に相当するスペクトルに変換した。それより、水平成分に関して最大乱子の周波数は無次元の型にして（即ち、周波数 \times 地上高 / 風速）、極端に不安定な場合には 0.01 より小さく、極端に安定な場合 0.1 より大きくなる。即ち最大乱子の大きさは不安定になるにつれて大きくなる。垂直成分については、いかなる安定度においても上述の無次元周波数が 0.1 より大きいように思われる。

8. 次に風向変動について調べた。元来、風向は野外で観測しやすい量であるにもかかわらず、風速にくらべて二次的に扱われて来たが、最近、大気中の拡散の問題が直接、風向変動と関係づけて論ぜられるようになり見なおされて来た。以下主に著者の得た野外観測の資料を解析する。

第一に標準偏差を計算し、安定度との関係を調べた。その結果(1)同じ高さでは、安定度とともに

減少する。(2)同じ実験番号のものでは、高さと共に少し減少するように見える。(3)中立の時には約 12° であつた。この標準偏差は、地面の粗さによつて左右される。これまで行われた二三の観測資料を見ると、比較的滑らかな原野では 7° 、相当粗い所では 14° を得ており、この場合は中間の粗さの場合にあたる。次に以上のような観測結果の理論的裏付けを試みた。風向が横方向の風速変動を平均風速で除した値で近似できると仮定する。横方向の風速変動、および平均風速の安定度に対する関係は前に述べたので、風向変動と安定度との関係も推測できる。この結果を米国オネールで得られた資料と比較して良い一致が見られた。

第二に、分散スペクトルを解析した。そのスペクトルと安定度との関係は、風速変動の場合と非常によく似た特徴を示している。すなわち周波数の高い領域では、安定度によらず $-5/3$ 乗法則に従っているが、低い周波数、例えば 0.2 s より小さい領域では、安定度に従つて分離する（安定になる程減少する）。以上のことを無次元量を使い第 I 部で述べた理論を応用して整理し説明した。

9. 最後に、ある特別な周波数だけに着目して変動を調べるため、特別に計算のため設計したフィルターを使用し、これを通した後の風向変動の資料を扱つた。計算量の都合によりケースタデイしかできなかつたが、得られた結果は次のようである。ある決まつた高さの資料の標準偏差は周波数とともに減少する。高い周波数の標準偏差は高さとともに減少するが、低いものは高さとともに増大するようである。これは地表面における摩擦のためであろう。続いて観測高度の異つた 2 組の資料の相互相関係数（遅れのある場合、ない場合の両方）を計算した。興味ある結果の一つは風向変動の位相変化が高い所から始まることである。

む す び

まだ十分な資料が得られたとは言えないから、完全に接地層の構造を理解するまでには到らないが、以上のような観測資料の解析により明らかになつたことの主なことは次のようである。(1)種々の物理量の平均値は、風速および温度のプロファイルにより一義的に決定される。これは Monin - Obukhov の相似理論の裏付けになる。ただし、非常に安定な時はまだ問題が残っている。(2)風速、風向の変動に関する統計量は、Kolmogoroff および Monin - Obukhov の理論を利用してよく整理される。(3)ある周波数に着目して得られた風向変動を調べた結果、一般的に変動現象の解析、特に非定常の時の解析に有力な手段として、このような方法が利用できる見通しがついた。

以 上

論 文 審 査 要 旨

著者は従来より温度成層のあるときの接地気層の乱流構造に興味を持ち、熱平板の風洞実験を始めとして、米国にて行なわれた膨大な実験資料を調べて乱れのスケールとエネルギー逸散との関係を明らかにすると共に、理論的にも乱れのスケールと安定度の関係を展開した。

本研究はこれらの研究の集大成であつて、本文は3部よりなる。

第1部は、理論的研究で乱流エネルギーの無次元逸散率 ϵ について述べてある。乱流の理論的研究はKolmogoroff及びMonin - Obukhovの理論によつて新生面が開かれたが、現在の所行きづまりの状態にあるようである。著者はKolmogoroffの提唱した慣性領域についてもMonin - Obukhovの相似理論が成立すると仮定して乱流エネルギー ϵ に表現を与えることに成功した。 ϵ の代りに無次元量 e をとり、 e が安定度のパラメーター ζ と風速分布を表わす $\phi(\zeta)$ で表わされ、他の物理量もこれ等の量と乱れのスケールで表現出来ることを示した。

第2部は、特に温度成層のあるときの接地気層の構造について観測データの整理についてのべてある。Monin - Obukhovの相似理論を基にして、風速及び気温の平均値の垂直分布が“対数直線、法則に従うとして、この実験式の可否を調べる方法を考案し、主に米国で行なわれた膨大な観測データを整理し、更に摩擦速度や乱流熱流束を求めて安定度との関係を求めた。

これらの検討の結果、次のことを明らかにした。“対数直線”法則は中立に近い安定度のときだけでなく、広い範囲で成立していてMonin - Obukhovの相似理論はこの接地層のなかでも成立している。唯直線項の係数はMonin - Obukhovの言うのと異なり安定度によつて変化する。第2にすべての物理的量は風速及び気温の垂直分布を示す基礎的な量のみによつて整理出来る。最後に通常用いられる“巾”法則を吟味し安定度との関係を調べて巾法則は近似的に成立することを示した。

第3部は、風速及び風向の変動について取扱つてある。先ず風速分布については標準偏差と摩擦速度の比と安定度との関係をしらべ、各成分は安定度と共に減少すること、水平方向は不安定になるに従い等方性に近づくこと、垂直成分は殆んど不変なことを示した。分散スペクトルについても同様なことを調べ、特に無次元量 e で表わした分散スペクトルは安定度によつてのみ決定されることを示した。

風向成分については、標準偏差は安定度及び高度と共に減少する。無次元型の分散スペクトルは安定度の広い範囲にわたるスペクトルを統一的に表現し、周波数の高い方は近似的に $-\frac{5}{3}$ 乗法則が成立し、低い方では安定度によつて分れる。

最後に、ある周波数だけに着目してその変動をみるために、フィルターにかけてしらべた。その結果、ある高さの標準偏差は周波数と共に減少すること、高い周波数では高さと共に減少するが、低い周波数は高さと共に増大する様子をみせることを示した。興味のあるのは風向変動の位相変化が高い所から始まることを示したことである。

本研究は行詰りの状態にある乱流の研究に新生面をかいたくし、今後の発展を期待させるものである。

よつて竹内清秀提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。